

고진공 터보 분자펌프용 자기베어링 시스템의 디지털 선형 제어시스템

노승국^{a*} · 경진호^a · 박종권^a · 남우호^b · 고득용^c

^a한국기계연구원 나노융합생산시스템연구본부, 대전 305-343

^b(주)제일진공, 안성 456-843

^c한국기계연구원 그린환경에너지기계연구본부, 대전 456-843

(2010년 5월 3일 받음, 2010년 6월 21일 수정, 2010년 6월 29일 확정)

본 논문에서는 고진공용 터보분자펌프의 비접촉 고속회전을 위한 자기베어링 시스템의 디지털 제어시스템의 설계에 대하여 소개하였으며, 실례로 800 l/s급의 고진공 펌프에 대하여 축 유연모드의 후방향 위험속도를 넘는 최대 40,000 rpm까지의 회전 실험 결과를 나타내었다. 제안된 제어시스템은 기본적으로 PID 기반의 직접제어 제어기와 자이로스코프 모멘트 효과를 제어하기 위한 교차제환기, 유연모우드 감쇄를 위한 리드필터와 동기진동 저감을 위한 노치필터 등으로 구성되어 있으며, 이러한 제어기는 자기부상형 터보분자펌프 외에 고속 플라이휠과 같은 자기베어링에 적용될 수 있다.

주제어 : 터보분자펌프, 자기베어링 시스템, 디지털 제어, 교차제환 제어, 유연축 제어

I. 서 론

진공펌프는 다양한 첨단산업에서 진공환경의 제공을 위하여 필수적인 부품/소재로써, 활용도가 계속 넓어지고 있으며, 산업의 고도화에 따라 요구되는 진공도 및 배기속도 또한 높아지고 있다 [1,2]. 이 중, 반도체 공정 등에서 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ Pa의 고진공 환경을 제공하기 위하여 사용되는 고진공 터보분자펌프(Turbomolecular Pump, TMP)는 다층의 회전것을 갖는 로터를 회전시켜 분자를 배출시키는 방식을 사용하는 진공펌프이다. 이러한 방식으로 고진공을 실현하기 위해서 가장 효과적인 방법은 회전블레이드의 선속도를 높이는 것으로, 이는 회전로터의 직경을 크게 하거나, 회전속도를 높임으로써 얻어질 수 있다. 따라서 최근의 고진공 터보분자펌프는 15,000~35,000 rpm의 고속회전을 요구하며, 이때 회전속도는 주로 로터 재료의 허용한도까지 적용되고 있다. 이러한 고속화에 있어서 베어링의 선정이 매우 중요하게 되는데, 고속회전에서의 구름베어링의 사용한계와 윤활의 어려움 등의 이유로 비접촉 방식인 자기부상 방식이 많이 적용되고 있다 [3-6].

자기베어링 시스템은 전자기력을 이용하여 자성체인 회

전축을 부상지지함으로써 비접촉 고속 회전이 가능하여 윤활이 용이하지 않은 진공 환경 등 가혹한 환경에 적합하다. 자기베어링 시스템의 설계는 크게 하드웨어와 소프트웨어로 나누어질 수 있는데, 자기베어링의 전자석 코어와 코일, 센서 및 축 등의 하드웨어 설계와 함께 제어시스템의 설계도 매우 중요하다. 이는 자기베어링 시스템이 불안정한 특성을 갖는 개루프계를 갖고 있으므로 작동 범위에서의 안정화를 위한 능동제어 시스템이 필수적이며 진동제어 등의 추가적인 기능이 요구되기 때문이다. 이러한 자기베어링계의 제어시스템으로 능동소자를 이용한 진기회로로 구성되어 있는 아날로그 제어가 많이 적용되었으나, 현대 제어 기법 등의 적용과 모델의 다양성, 제어기능의 확대에 따라 큰 유연성을 갖는 디지털 제어시스템이 자기베어링 시스템에 최근에 주로 적용되고 있다.

터보분자펌프 로터는 진공상태의 회전이므로 반경방향의 하중은 크게 작용하지 않으나, 일반적인 축 시스템에 비하여 회전하는 로터의 극관성 모멘트가 크며 높은 회전수로 인하여 자이로스코우픽 모멘트를 무시할 수 없다. 또한 회전수가 높으므로 축의 유연모우드에 근접한 주파수의 진동이 쉬우므로 이 또한 고려의 대상이 되어야 하며, 로터의

* [전자우편] cniz@kimm.re.kr

회전시 회전불균형에 의하여 발생하는 진동이 베어링 하중으로 작용하여 펌프의 진동원인으로 작용하는 것을 제거할 필요가 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 고진공 터보분자펌프용 자기베어링 시스템의 제어기 설계에 대하여 소개하였으며, 실례로 800 l/s 급의 고진공 펌프에 대하여 최대 40,000 rpm까지의 회전실험 결과를 나타내었다. 제안된 제어시스템은 기본적으로 PID 기반의 직접회환 제어기와 자이로스코픽 모멘트 효과를 제어하기 위한 교차회환기, 유연모우드 감쇄를 위한 리드필터와 동기진동 저감을 위한 노치필터 등으로 구성되어 있으며, 이러한 제어기는 자기부상형 터보분자펌프 외에 고속 플라이휠과 같이 자기베어링이 적용된 분야에 응용할 수 있다.

II. 디지털 제어시스템 설계

1. 자기부상형 터보분자펌프 시스템

본 논문의 자기부상형 터보분자펌프의 구동부 및 로터의 개념도는 Fig. 1과 같다. 최대 회전수 40,000 rpm의 BLDC 모터(500 W)로 구동되며 5축 능동 자기베어링 시스템으로 지지되는 구조이다. 자기베어링은 유도형 반경방향 변위센서(16-pole, 50 V/mm, 1,000 Hz bandwidth) [7,8]와 반경방향 및 축방향 자기베어링 액츄에이터로 구성된다. 각각의 반경방향 자기베어링 및 센서는 X Y의 자유도를 가

지고 있어 전체 5자유도의 제어 시스템으로 구성된다.

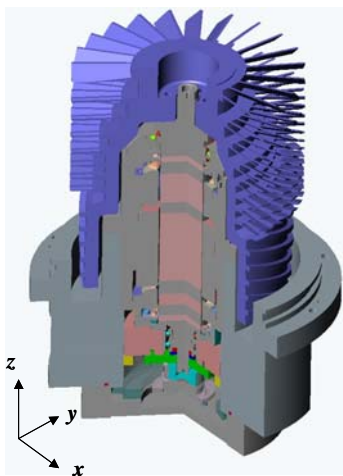
자기베어링의 제어시스템은 DSP를 이용한 디지털 제어 시스템으로, 25 kHz의 샘플링 주파수를 갖는다. 제어된 출력은 전력증폭기(0.05 A/V, 1500 Hz bandwidth)를 통하여 코일에 전류로 인가된다.

회전부분에 대한 자기베어링 및 로터에 대한 좌표를 나타낸 것이 Fig. 1(b)이며, 이를 제어하기 위하여 본 연구에서 적용한 제어기의 블록선도를 Fig. 2에 나타내었다. 첨자 a는 하부 베어링, b는 상부베어링을 나타내며, 적용된 제어기는 안정화 및 강성, 감쇄를 위한 PID 제어기, 자이로스코픽 모멘트 보상을 위한 교차회환기, 유연모우드 감쇄를 위한 Lead Filter, 진동 저감을 위한 노치필터로 구성되어 있다. 고속회전에 의한 특성이 반경방향에만 나타나므로 본 논문에서는 반경방향의 제어에 관하여 주로 다루도록 한다.

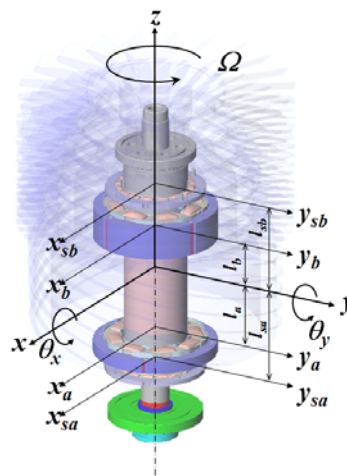
2. PID 제어기

일반적으로 강체 회전체에 대한 운동방정식은 축방향 특성을 제외할 때 식 (1)과 같이 4자유도 시스템으로 나타낼 수 있고, 여기서 $[M]$, $[G]$ 는 질량과 자이로스코픽 행렬, $[K_x]$ 는 자기베어링 액츄에이터의 변위강성 행렬로서 불안정한 강성을 갖으며 $[K]$ 는 자기베어링의 전류강성 행렬을 의미한다. 그리고 벡터 q 와 i 는 각각 변위와 입력전류이다.

$$[M]\ddot{q} + [G]\dot{q} - [K_x]q = [K]i \tag{1}$$



(a) magnetic bearing system and rotor



(b) magnetic bearings and axis of motion

Figure 1. Turbomolecular pump with magnetic bearing system.

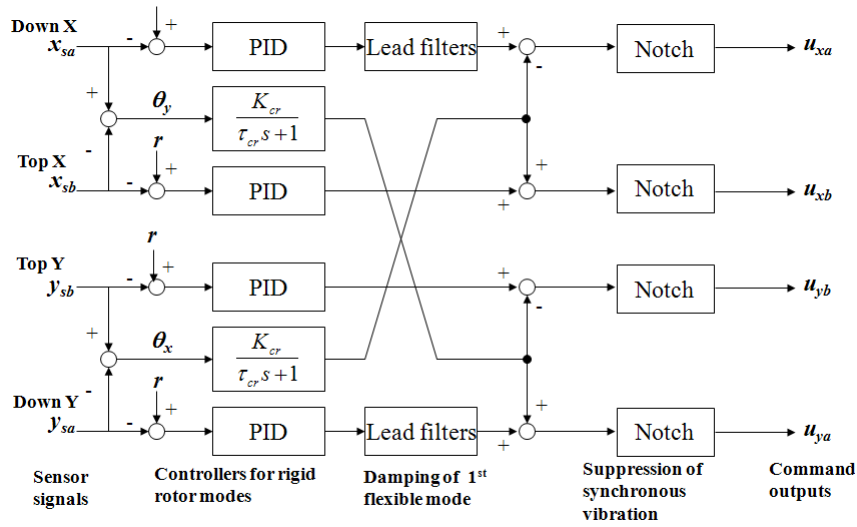


Figure 2. Block diagram of digital control system.

$$q = [x \ y \ \theta_x \ \theta_y]^T, \quad \dot{i} = [\dot{i}_x \ \dot{i}_y \ \dot{i}_{\theta_x} \ \dot{i}_{\theta_y}]^T$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_y \end{bmatrix}, \quad [G] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -J_p \Omega \\ 0 & 0 & J_p \Omega & 0 \end{bmatrix}$$

만약 각각의 제어축을 독립적으로 볼 수 있다고 가정할 때, 독립된 1축계의 변위 x_1 , 전류 i_{x1} , 질량을 m_{x1} 라 할 경우 한 축에 대한 운동방정식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 특히 시스템의 안정성을 만족하기 위해서는 최소한 하나의 비례와 미분요소를 가지고 있는 비례-미분(PD)기(식 (3))가 필요하며, 이때 시스템의 안정성을 만족하기 위한 조건은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 K_p 는 비례게인이고 K_D 는 미분게인이며 K_s , K_{amp} 는 각각 센서와 전력증폭기의 증폭비이다.

$$m_{x1} \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} - K_{x1} x_1(t) = K_{i_{x1}} i_{x1}(t) \quad (2)$$

$$i_{x1}(t) = -K_{amp} K_s K_p x_1(t) - K_{amp} K_s K_D \frac{dx_1(t)}{dt} \quad (3)$$

$$K_p K_{amp} K_s K_{i_{x1}} - K_{x1} > 0, \quad K_D > 0 \quad (4)$$

여기서 설계된 강성을 K_{eq1} , 감쇠비를 ζ_1 이라고 할 때 비례게인과 미분게인은 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$K_P = \frac{K_{eq1} + K_{x1}}{K_s K_{amp} K_{i_{x1}}}, \quad K_D = \frac{2\zeta_1 \sqrt{m_{x1} K_{eq1}}}{K_s K_{amp} K_{i_{x1}}} \quad (5)$$

위의 설계는 연속계에서의 비례 미분제어기의 설계이지만 이러한 제어기를 디지털 제어시스템에 적용하는데 있어서 bilinear 변환을 이용하여 다음의 (6)과 같은 이산계 전달함수로 변환할 수 있다. 본 제어기에는 실제 적용에서의 미분기의 고주파 가진을 막기 위하여 시정수 τ_d 를 갖는 저역통과 필터를 포함하고 있다. 여기서 h 는 디지털 제어기의 샘플링 시간(0.04 msec)을 나타낸다.

$$G_{IDD}(z) = P(z) + D(z) + I(z) = K_P + \frac{2K_D(z-1)}{(2\tau_d+h)z + (h-2\tau_d)} + K_I \frac{h(z+1)}{2(z-1)} \quad (6)$$

이러한 직접제환을 위한 제어시스템을 5축의 자기베어링에 각각 적용하게 되며, 실제로는 상부 및 하부 자기베어링 특성이 정확히 독립적이도록 제작되지는 않으며, 연성이 존재하게 된다. 또한 로터의 질량중심이 상부베어링에 가깝게 위치하므로 상부 반경방향 자기베어링의 하중용량이 크게 설계되어 있으며, 따라서 상하부 베어링이 다른 특성을 가지게 된다. 본 모델에서는 페루프 강성을 자기베어링의 개루프 강성과 비슷하게 하고, 감쇠비 0.5 이상을 위하여 상부 베어링에서는 $K_p=3.5$, $K_D=0.008$, $K_I=5$, 하부 베어링에서는 $K_p=3.5$, $K_D=0.004$, $K_I=5$ 로 설계되었으며

축방향 베어링의 경우 $K_p=16$, $K_D=0.05$, $K_I=5$ 로 설계되었다. 이 때, τ_d 는 $1/(700\pi)$ 로 설정하였다.

3. 교차궤환

TMP는 기체 분자에 운동을 가하기 위한 회전깃 로터가 있어 극관성 모멘트가 크므로 고속회전 시에 자이로스코픽 효과(gyroscopic moment)에 의한 전방향 혹은 후방향 선회운동이 발생하게 된다. 즉, 식 (1)에서 $[G]$ 의 영향을 무시할 수 없게 된다. 이 중 후방향모드 선회운동(backward gyroscopic motion, precession)은 회전방향과 반대이므로 회전 불균형에 의하여 가진되지는 않지만 높은 회전수일수록 낮은 주파수를 가지면서 감쇠 또한 작기 때문에 노이즈나 충격과 같은 의란에 쉽게 발생되므로 고속회전 시 제어를 필요로 한다.

이러한 후방향 선회운동을 제어하기 위하여 앞절의 직접궤환 비례-미분 제어기에 교차궤환(inter-axis cross coupling feedback) 루프를 추가시킴으로 감쇠비를 증가시킬 수 있다. 교차궤환 루프는 위, 아래 센서의 x 방향 신호와 y 방향 신호를 각각 차감하여 각운동 값을 만든 후, 각운동 변위 신호에 저역통과 필터 사용하고, 제어게인 K_{cr} 을 곱하여 교차하여 궤환시킨다(Fig. 2).

이러한 2자유도의 각운동 운동방정식을 복소화된 각운동 변위($\Theta=\Theta_x+j\Theta_y$)와 이때 작용하는 토크 T를 이용하여 나타내면 다음과 같으며,

$$J_l \ddot{\theta} + (C_{\theta e} - jJ_p \Omega) \dot{\theta} + K_{\theta e} \theta = T \quad (7)$$

여기서 $C_{\theta e}$, $K_{\theta e}$ 는 PD 제어된 시스템의 등가 각운동 감쇠와 강성이다. 교차궤환에 의해 발생하는 제어력 토크 T는 Θ 를 저역통과시킨 값 p의 교차궤환에 의하여 다음과 같이 나타내어질 수 있다. 여기서 K_G 는 자기베어링 제어계에 의한 각운동 토크 전달 계수를 나타낸다.

$$T = jK_G K_{cr} p \quad (8)$$

$$\tau_{cr} \dot{p} + p = \theta \quad (9)$$

여기서 τ_{cr} 은 후방향 원추모우드를 검출하기 위한 시간 상수로 $1/\tau_{cr}$ 가 후방향 모우드 진동수보다 크고, 전방향 모우드 진동수 보다는 작아야 한다. 이렇게 저역통과필터를 사용하는 경우에는 회전수를 검출할 필요가 없어서 구현이

용이한 장점이 있으나, 필터를 저속에서부터 사용하는 경우에는 시스템 안정성을 검토하여야 한다.

Fig. 3은 회전수의 변화에 따른 극점이동을 나타내고 있는데 고속으로 올라가더라도 극점의 위치가 상대적으로 허수축에 근접하지 않아 일정한 감쇠비를 유지하고 있음을 알 수 있다.

4. 유연모우드 제어를 위한 위상 보상기

실제 제작된 주축의 경우, 약 617 Hz에 유연모우드를 갖는

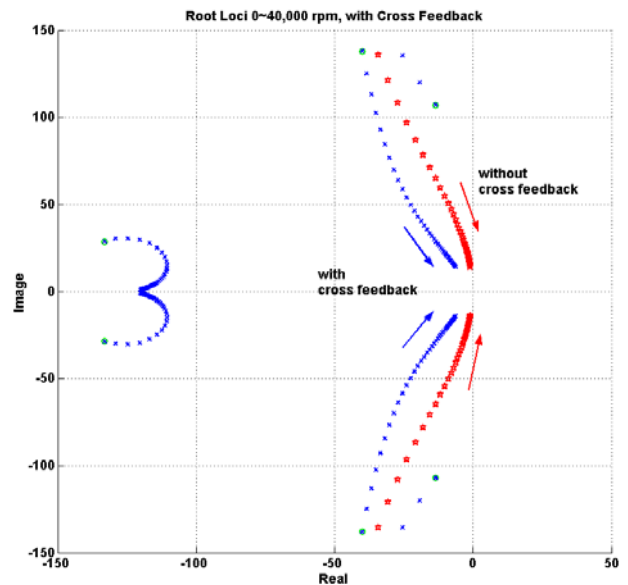


Figure 3. Root loci due to rotational speed.

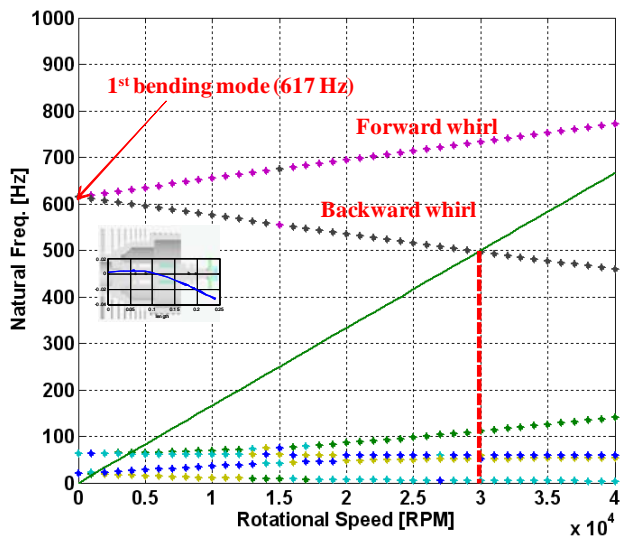


Figure 4. Mode shape of first flexible mode.

것으로 나타났으며, 회전수에 따른 고유진동수의 변화를 나타낸 Fig. 4에서 알 수 있듯이, 30,000 rpm 근처에서 유연모우드의 후방향 선회 모우드와 만난다. 이러한 유연모우드는 감쇠가 작아서 정지 상태 및 고속회전에 안정성을 해치므로 보정이 필요하다.

본 시스템의 유연모우드는 하부 베어링에서의 변위가 큰 형태로 나타나고 있으며, 강제모우드 고유진동수와는 많이 떨어져있어, 하부 반경방향 베어링에 해당 모우드의 고유진동수가 분포하는 주파수대역(400~700 Hz)에 리드 필터를 추가하여 감쇠비를 증가시키도록 하였다. Fig. 5는 연속계 전달함수 $G(s)$ 가 식 (10)과 같은 IIR 위상 앞섬 보상기(Lead filter) 2개($a_f=7$, $\omega_f=1250$ Hz)를 직렬하여 포함하였을 때의 제어기의 전달함수를 나타내고 있다.

$$G_I(s) = \frac{\alpha_f s + \omega_f}{s + \omega_f} \quad (10)$$

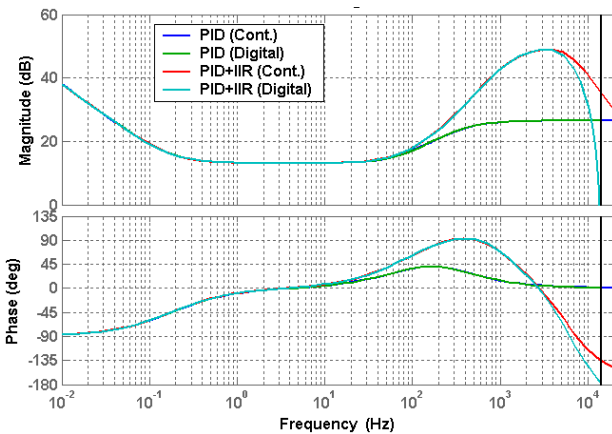


Figure 5. Transfer function of designed digital controller.

5. 회전진동 저감을 위한 노치 필터

고속 회전체에 있어서 진동의 가장 큰 원인은 로터에 존재하는 질량 불균형이다. 질량 불균형에 의한 원심력은 회전수의 제곱에 비례하므로 고속회전을 하는 터보분자펌프의 경우 로터 불균형에 의해 발생하는 진동을 최소화하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 로터의 밸런싱이 필수적이다. 그러나, 밸런싱 한계에 의하여 일정량의 불균형을 피할 수 없으며, 이 때문에 발생된 로터변위에 따라 자기베어링 액츄에이터에서 제어력이 발생되어 고속회전에서 회전수에 동기되는 제어입력과 이에 의한 진동이 펌프 하우징에 전달되는 현상이 발생된다. 이를 제거하기 위하여 제어입력에서 회전주파수에 해당하는 신호를 제거해주는 노치필터를 적용하는 경우 로터 불균형에 의한 회전주파수 성분의 진동을 감소시킬 수 있게 되며, 이는 자기베어링을 적용하여 얻을 수 있는 또 하나의 이점이라 할 수 있다 [9]. 터보분자펌프의 경우 회전속도가 일정하므로, 노치필터의 주파수는 고정하여 적용한다. 이때 실제 로터는 질량중심축으로 회전함에 따라 이심량 만큼 변위가 생기므로 로터의 정밀한 밸런싱이 기본적으로 선행되어야 한다.

III. 실험 결과

1. 동특성 실험

제안된 제어기의 실제 적용된 시스템은 다음의 Fig. 6과 같이 구성되었다. 회전특성의 평가를 위해 800 l/s급의 로

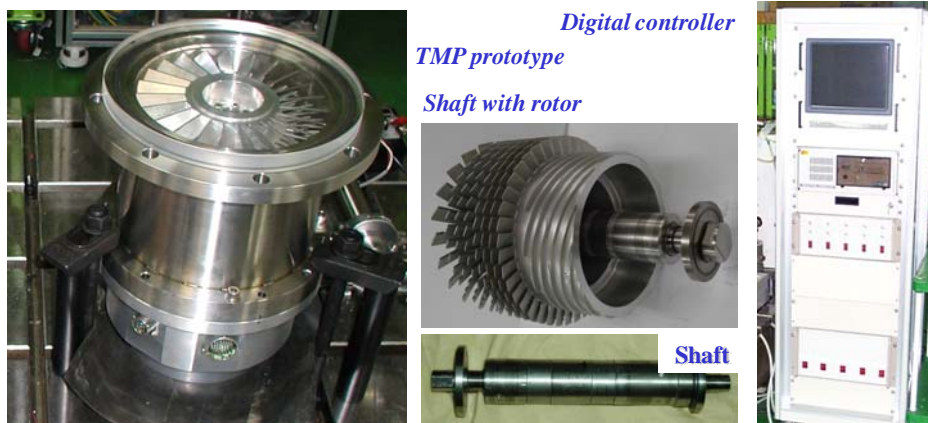


Figure 6. A set-up of Turbomolecular pump with magnetic bearings.

터에 적용하였으며, 제어기의 특성에 따른 응답을 통하여 설계된 제어기의 특성을 평가하였다.

Fig. 7은 정지 시 자기베어링이 부상상태일 때, 하부 베어링의 제어 명령측에 노이즈신호를 주어 센서신호와의 주파수 응답을 측정된 결과를 나타내고 있다. IIR Filter (위상 앞섬 보상기, Lead filter)를 추가하지 않은 경우에 비하여 600 Hz 부근의 유연모우드의 공진에 대하여 감쇠가 증가했음을 알 수 있으며 시스템의 강체 모우드의 고유진동수는 약 60 Hz 정도가 됨을 알 수 있다. 또한 강체 모우드에 대해서는 충분한 감쇠비를 가지고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8은 20,000 rpm에서 교차제환을 추가한 경우와 추가하지 않은 경우의 응답을 나타내고 있다. 교차제환이 없는 경우는 저주파의 진동이 크게 증폭되고 있으나 교차제

환 적용할 경우 보상이 잘 이루어져 저주파 진동이 나타나지 않음을 알 수 있다.

Fig. 9는 40,000 rpm 회전 시 질량 불균형이나 센서의 런아웃 등에서 발생하는 회전동기성분의 하우징 진동을 제거하기 위하여 667 Hz의 IIR Notch Filter를 적용하고, 이때의 하우징의 진동을 가속도계로 측정하여 적분한 변위값을 나타내고 있다. Notch filter를 적용하는 경우에 노치 주파수성분의 제어출력이 줄어들어 따라 진동의 크기가 0.03 μm 정도로 줄어든 것을 알 수 있다.

2. 회전 실험 결과

Fig. 10은 40,000 rpm 회전시의 반경방향 베어링의 상

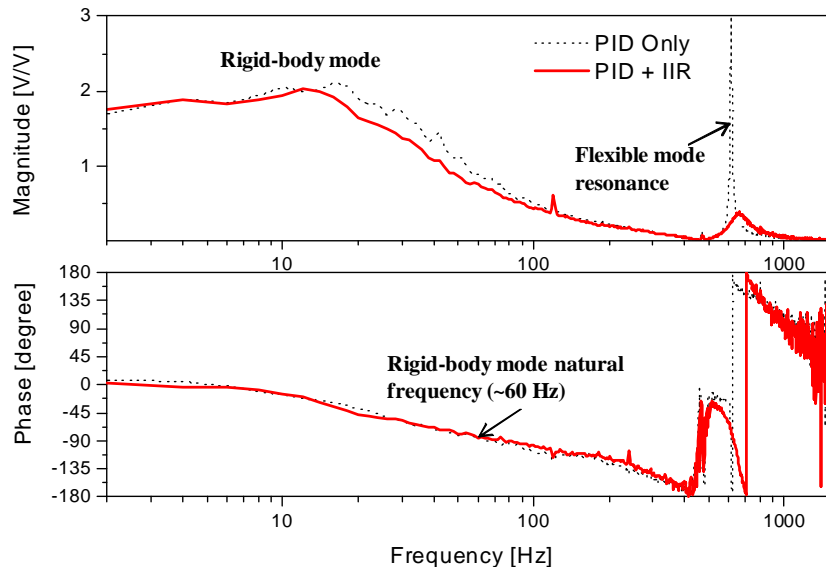


Figure 7. Transfer function of magnetic bearing (down).

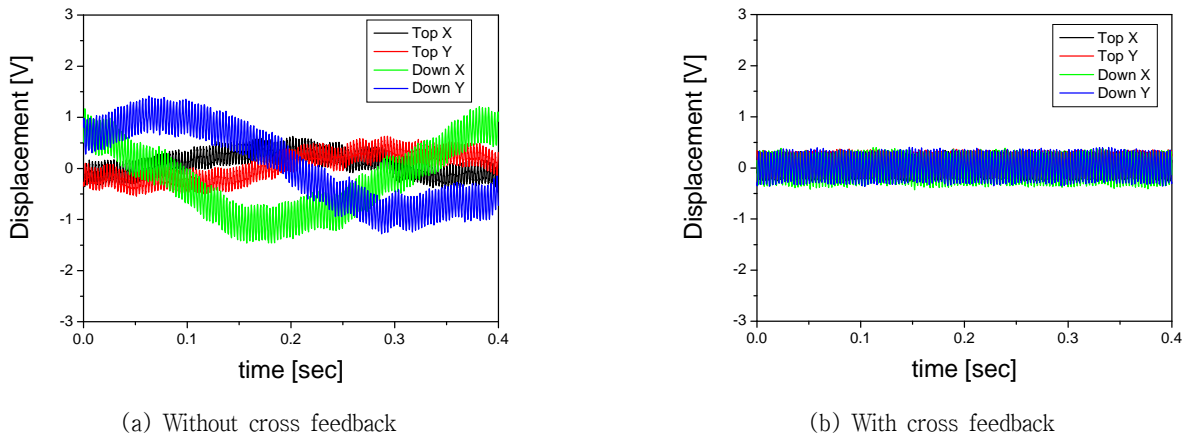


Figure 8. Radial displacement at 20,000 rpm.

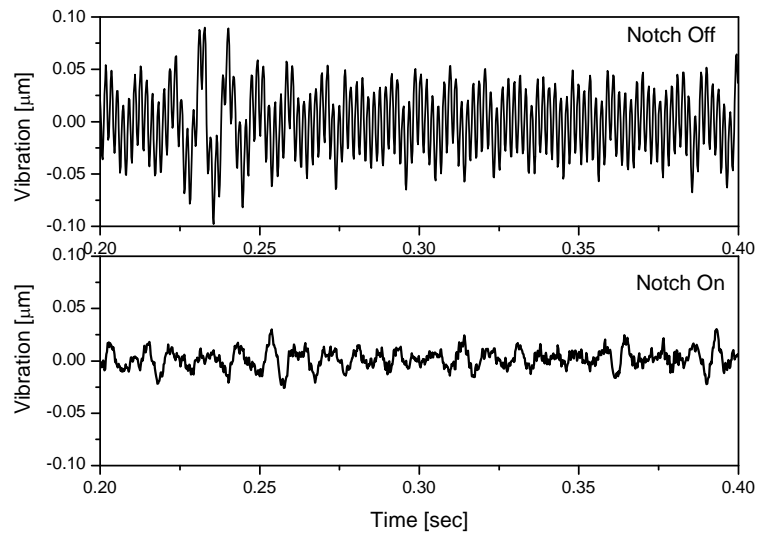


Figure 9. Housing vibration measured at 40,000 rpm.

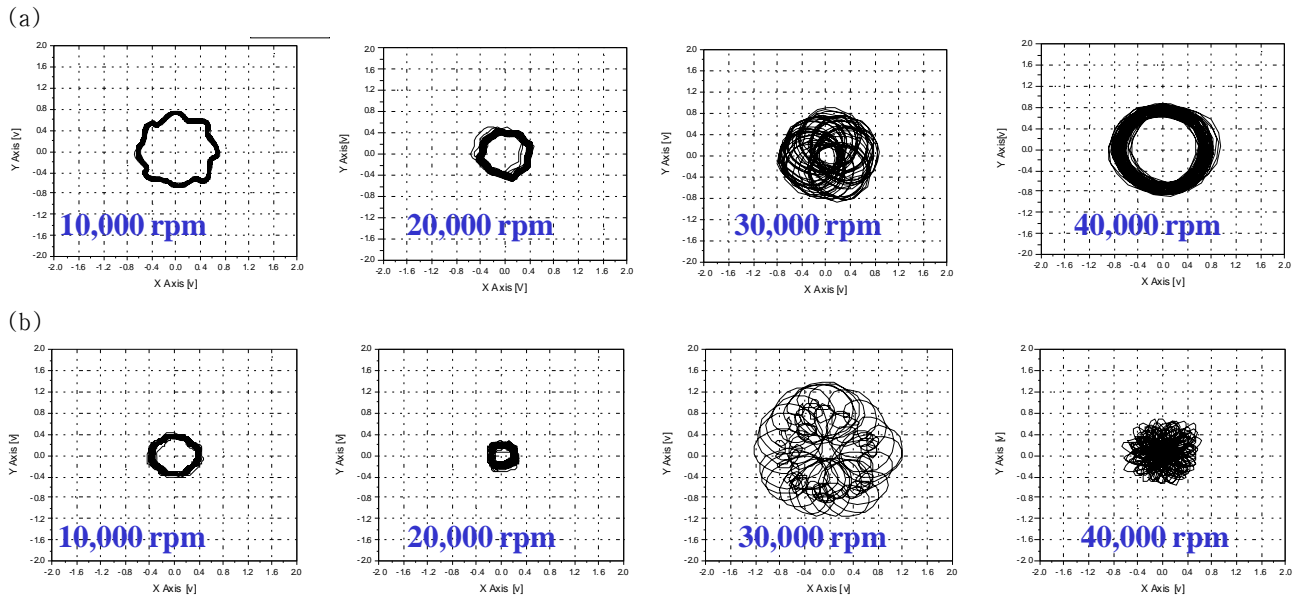
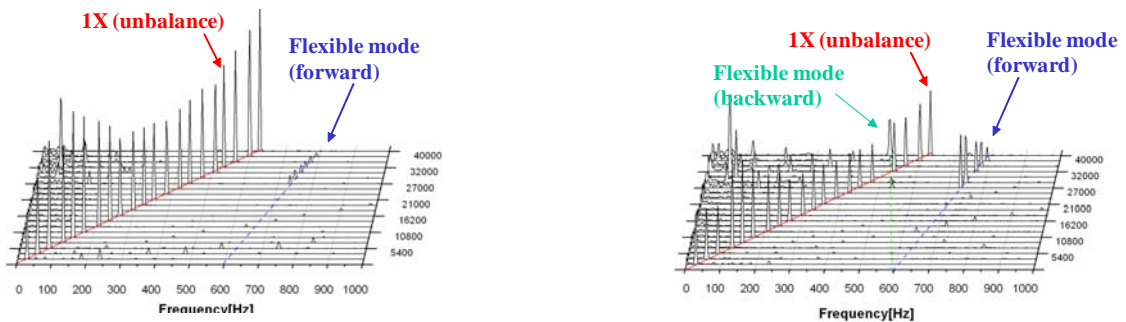


Figure 10. (a) Rotating response of top bearing sensor (0.2 V/div). (b) Rotating response of down bearing sensor (0.2 V/div).



(a) Top x direction

(b) Down x direction

Figure 11. Frequency spectrum of radial sensor.

부 및 하부 반경방향 센서의 XY 플롯을 나타내고 있다. 회전그래프의 한 개 눈금은 0.2 V로 약 4 μm 의 크기를 갖는다. 따라서 최대 회전크기는 하부 베어링의 경우 24 μm , 정도이며, 30,000 rpm 부근에서 복잡한 형상이 나타나는 것으로 보아 다양한 주파수 성분이 섞이게 됨을 알 수 있다. 이는 주파수 성분을 나타낸 Fig. 11에서 명확히 볼 수 있는데, 회전수 비동기성분과, 하부 베어링에서 나타나는 유연모우드의 Forward 및 backward 성분들을 확인할 수 있다. 또한, 30,000 rpm 부근에서 유연모우드의 후방향 모우드를 통과하여 안정하게 부상 회전되고 있는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서 고진공 터보펌프용 자기베어링 시스템의 디지털 제어기에 대하여 소개하고 실험결과를 나타내었다. 자기베어링의 안정화와 감쇠를 위하여 PID제어기를 설계하여 각 베어링에 적용하는 직접 제환방식을 적용하였다. 고속에서의 자이로스코픽 모멘트에 의해 발생하는 저주파 강체모드 후방향 선회 운동을 교차제환을 통하여 효과적으로 제어하였으며, 유연모우드의 가진을 감쇠시키는 위상보상기와 진동 제거를 위한 노치필터를 적용하여 40,000 rpm까지의 회전에 안정성을 확보하였다. 이러한 디지털 제어시스템은 고진공 터보분자펌프 등 대형 로터용 자기베어링에 기본적인 시스템으로 적용할 수 있을 것으로 기대되며, 디지털 방식을 적용함으로써, 차후 필요에 따라 다양한 제어시스템의 설계와 적용 시에 시간과 효율성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

논문은 지식경제부가 지원하는 전략기술개발사업(초고속 복합분자펌프 기술개발, 과제번호 10031974)의 일환으로 연구되었다.

참고문헌

- [1] 신진현, 고문규, 정완섭, 윤주용, 임종연, 강상우, 한국진공학회지 **18**, 411-417 (2009).
- [2] 주장현, 김효배, 김중조, 한국진공학회지 **17**, 278-291 (2008).
- [3] 노승국, 경진호, 박종권, 노명규, 한국정밀공학회 추계 학술대회 논문집 pp. 361-365, (2002).
- [4] I. Satoh, J. Nagahiro, C. Murakami, and A. Nakajima, Proc. of 1st Int. Symp. Mag. Brg. pp. 169-176 (1988).
- [5] Y. Kanemitsu, M. Ohsawa, and K. Watanabe, 1Proc. of 1st Int. Symp. Mag. Brg. pp. 367-380 (1988).
- [6] 노승국, 경진호, 박종권, 배완성, 이홍균, 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집 (2004).
- [7] 노명규, 박병철, 노승국, 경진호, 박종권, 한국정밀공학회지 **21**, 72-28 (2004).
- [8] M. D. Noh, S. R. Cho, J. H. Kyung, S. K. Ro, and J. K. Park, IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, **10**, pp. 626-631 (2005).
- [9] S. K. Ro and J. K. Park, International J. Prec. Eng. And Manu. **6**, 19-25, (2005).

Digital Linear Control System for a Magnetic Bearing System of a High Vacuum Turbomolecular Pump

Seung-Kook Ro^{a*}, Jin-Ho Kyung^a, Jong-Kweon Park^a, Woo-Ho Nam^b, and Deug-Yong Koh^c

^a*Nano-Convergence and Manufacturing Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 305-343*

^b*Jeil Vacuum Corp., Anseong, 456-843*

^c*Environment and Energy Systems Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 456-843*

(Received May 3, 2010, Revised June 21, 2010, Accepted June 29, 2010)

In this paper, a digital controller of magnetic bearing system for a high vacuum turbomolecular pump (TMP) is designed and examined. For stabilizing and providing damping in magnetic bearing, the digital PID controller is applied for each 5 control axes, and the inter-axis cross feedback controller is also applied to suppress low frequency vibration caused by gyroscopic moment of the rotor at high speed of rotation. The fabricated rotor-shaft has its first flexible natural frequency lower than maximum speed, about 614Hz, so the two lead filters are applied to increase damping of flexible mode. Notch filters with rotating frequency were selected to reduce vibration of the pump housing caused by unbalance load. The implemented controllers are verified by examination of frequency response and rotating test up to 40,000 rpm, which is higher than critical speed of backward flexible mode.

Keywords : Turbomolecular pump, Magnetic bearing system, Digital control, Cross feedback, Flexible mode control

* [E-mail] cniz@kimm.re.kr